

特高压直流输电控制与保护技术的研究

王 徕

(华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 随着特高压大电网和交直流并网的开展, 直流输电技术逐渐被广泛应用在实际工程中。在直流输电系统和换流技术研究的基础上, 结合云广±800 kV 特高压直流输电工程, 系统地介绍了直流输电控制保护系统的分层冗余结构以及不同故障对应的保护措施, 并提出了直流输电工程中存在的问题和解决方案。特高压直流输电控制保护系统的研究对特高压大电网和交直流并网的可靠、有效运行具有十分重大的意义。

关键词: 特高压直流输电工程; 换流技术; 直流输电控制保护系统

Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission

WANG Yao

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the development of the ultra high-voltage transmission network and AC-DC merging into the network, ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology is widely used in practical engineering. Based on the DC transmission system and the conversion between AC and DC by considering ± 800 kV Yun-Guang project, the paper systematically introduces the redundant and hierarchical structure and protection measures corresponding different faults of the control and protection system of UHVDC. Then it brings forward the problems and solutions of a UHVDC project. The study is great significant to the high-voltage transmission network and AC-DC merging into the network.

Key words: ultra high-voltage transmission network; conversion; control and protection system of HVDC

中图分类号: TM72; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0053-06

0 引言

早在18世纪末, 法国就曾用2 000 V直流发电机, 将电能经56 km直流输电线路送给用户。随着人类文明的不断发展, 输电线路的逐渐增长, 简单的直流输电已不能满足长距离大容量输电, 并且面临着换向困难等问题, 因此简单的直流输电逐渐被交流输电所取代。但直流输电技术的研究没有止步, 被应用到瑞典100 kV、20 MW海底电缆中, 成为世界第一条汞弧阀直流输电线路。由于光纤和计算机新技术的迅猛发展, 可控硅换流器和直流断路器开关研制成功, 有效改善了直流输电控制性能, 提高了电力系统运行可靠性, 加速了直流输电系统朝向多端发展, 实现了直流输电技术在交流系统联网和分割功能^[1]。21世纪, 特高压大电网与交直流并网的实施, 赋予特高压直流输电系统新的历史使命。

1 直流输电简介

1.1 直流输电系统^[2,3]

目前, 直流输电系统一般为两端直流输电系统,

由整流站、直流线路和逆变站三部分组成。如图1所示, 交流电力系统I为送电端, 交流电力系统II为受电端, 由交流系统I将交流功率经换流变压器1, 送到整流器, 变换成直流功率, 然后把直流功率通过直流线路送给逆变器, 逆变器将直流功率变成交流功率, 再经过换流变压器2, 把交流功率送入受电端的交流电力系统II。整流站和逆变站统称为换流站, 它的功能是实现交流电力和直流电间的变换, 是直流输电系统中的主要环节。

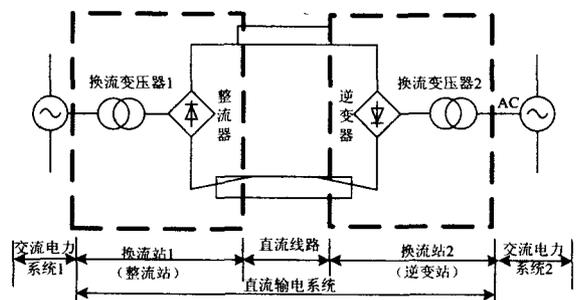


图1 直流输电系统示意图

Fig.1 DC transmission system diagram

1.2 换流技术

换流站的核心元件是换流器，由 1 个或多个换流单元串联而成，电路均采用三相换流桥，材料多采用可控硅阀（晶闸阀）。它的基本工作原理是，控制调节装置通过控制桥阀的触发时刻，可改变触发相位，进而调节直流电压瞬时值、电阻上的直流电流、直流输送功率。同时，相同的触发脉冲控制每个桥阀的所有可控硅元件。当三相电源为对称正弦波的情况下，线电压由负到正的过零点时，脉冲触发桥阀，同时阀两端电压变正，阀立即开通。6 个脉冲发生器分别完成对单桥换流器的 6 个桥阀的触发，恰好交流正弦波电源经过 1 个周期，线电压又达到下一个过零点进行第二个触发周期。三相换流桥与触发脉冲控制过程如图 2 所示。

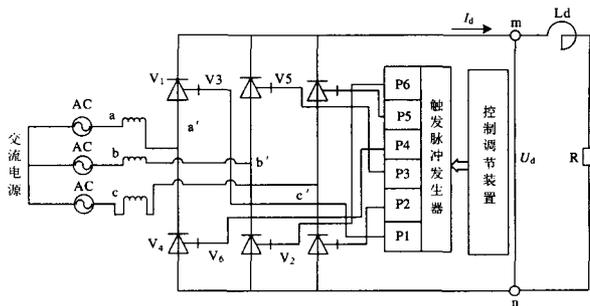


图 2 三相换流桥与触发脉冲控制示意图

Fig.2 Three-phase converter bridge with the trigger pulse control diagram

工程上为了获得脉波更小的直流输电电压，通常采用 12 脉的双桥换流器。

2 直流输电控制系统分层冗余结构

特高压直流输电系统（UHVDC）一般指 600 kV 以上的直流输电系统，其控制保护系统采用分层分布式结构，完全冗余配置，如图 3 所示。本文结合云广±800 kV 特高压直流工程，将直流输电控制系统按照控制级别的不同分为运行人员控制层、过程控制层、现场控制层三层^[4,5]。

2.1 运行人员控制层

运行人员控制层主要完成对运行人员控制系统的基本功能，包括控制操作、事件顺序记录（SER）、自动功率控制、图形页面显示、报表处理系统、谐波监视、保护信息处理、曲线显示、用户管理等功能。

运行人员控制系统所涉及的控制操作包括 UHVDC 系统的正常启动/停运控制、状态控制、运行或故障时运行人员控制及换流站内主设备及其辅助

系统的操作控制等。

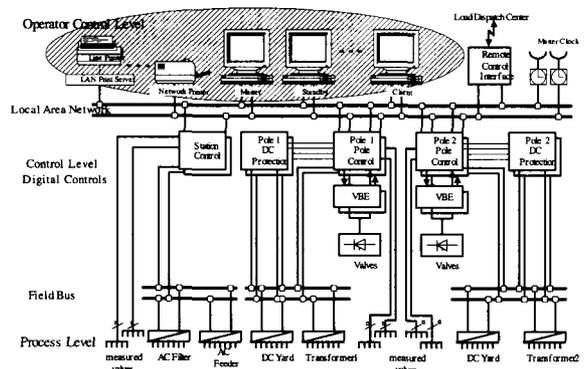


图 3 直流输电控制系统分层结构

Fig.3 HVDC control system hierarchy

交流/直流运行人员工作站、远动工作站、SER 工作站、打印机的 LAN 网都采用双工作站的冗余配置。一个工作站有效的进行控制，另一个工作站的数据被实时刷新，运行在一个热备用模式下，可以在主设备故障后的几秒内自动从热备用状态切换到主状态，和调度中心的通信接口也同时进行切换。

2.2 过程控制层

过程控制层是直流输电控制系统的核心部分，包括极控系统和交流/直流站控系统。交流/直流站控系统执行交流控制和 UHVDC 换流站直流系统相关的功能。例如：无功功率设备的投切控制和 800 kV 直流场的监视和控制换流。

极控系统则根据运行人员发出的命令产生正确、稳定、有效的功率定值，执行所有和双极、极、换流器相关的功能，并且提供换流器运行和阀出发所必需的控制功能。其主要控制方式为直流电流控制、直流电压控制和触发角控制。

2.2.1 交流/直流站控系统

交流/直流站控系统以顺序控制交流场或换流站直流系统为任务，采用 SIMATIC67 硬件平台。为减少因一个故障或系统维护而导致直流输电系统的不可用，交流/直流站控系统采用双重化配置的冗余结构，冗余范围包括所有层的所有系统，以及从输入输出网络到 SCADA、LAN 网。

2.2.2 极控系统

极控制系统的功能分三层实现：双极控制层、极控制层和换流器控制层。其中换流器控制层又称阀控系统（VBE）^[6]。

1) 双极控制层

双极控制层实现与双极运行有关的控制功能，接受运行人员指令，产生相应的极功率/电流参考值，将这个值送到极控制层，并且对两极之间的功

能进行协调。具体的功能有：稳定控制功能、运行人员设定功率参考值、功率传输方向控制、电流平衡控制(CBC)、极间电流转移(PPT)等。

2) 极控制层

极控制层完成与极相关的控制功能,从双极控制层接受极电流/功率参考值,进一步产生换流器层闭环控制所需要的直流电流、直流电压、熄弧角控制参考值。具体的功能有:极的解锁/闭锁过程、极的空载加压实验、直流线路故障恢复顺序、极电流限制(PCL)、极电流协调(PCOC)、低压限流环节(VDCL)、换流器协调控制、分接头控制等。

3) 阀控系统(VBE)

阀控系统(VBE)是由晶闸管控制与监测、光发射、光接受、反向恢复其保护控制单元、供电电源及接口、避雷检测、漏水检测等硬件组成。这些硬件均采用并行可自动切换的冗余设置。VBE的运行模式包括触发准备就绪阶段、负电压检测阶段、反向恢复期保护阶段和关断状态四个阶段。

阀控系统(VBE),即换流器层完成与12脉冲换流器相关的功能,包括高速地直流电压闭环控制器、直流电流闭环控制器、熄弧角闭环控制器、换流阀的闭锁/解锁过程等,并产生触发角送到阀控接口单元。其主要功能如下:产生触发脉冲分别触发所有晶闸管、检测晶闸管及相关设备的状态、在反向恢复期对晶闸管进行保护、产生阀电流过零关断信号发送至极控系统。

整个极控系统按照冗余双通道的原理设计,两个通道接受相同的输入信息,有切换逻辑决定哪一个系统进行有效的控制,哪一个系统在热备用状态,但是任一时刻只有一个系统进行有效的控制输出。

2.3 现场控制层

现场控制层提供了交直流主设备就地控制的可能性,与近距离主设备接口通过硬连线进行;与较远距离的主设备的接口通过现场总线进行。现场控制系统主要是指分布式的I/O控制单元,执行二进制和模拟量的预处理、高压装置的联锁、SER事件的产生、就地控制、控制命令的输出和监视、自诊断等功能。

各级控制层通过高速LAN和现场总线profibus共同组成一个分层、分布式控制系统。控制命令(来自调度中心的命令)通过处理下达,过程数据(如监控系统的实际值或报警信息)则逐层向上传输。其中LAN是采用国际标准并符合工业标准的装置、抗电磁干扰能力强的局域网。现场总线profibus采用“令牌传递”通信规约,即主系统和从系统之间采用循环问题的方式传输数据。

3 直流输电系统的可能故障类型及相应的保护

3.1 换流站可能的故障类型^[7-9]

在直流输电的实际工程中,直流控制系统是保护的重要组成部分,系统装置误动,换相失败,由雷电或污秽引起的绝缘失效等都将引起换流站故障和扰动^[7]。结合换流站的过电流和过电压两个主保护功能,分析换流站可能经受的基本故障类型有:

1) 电流中断(CE)

当阀电流跌落到低于晶闸管的维持电流时,将发生电流中断。由于感性电流截波效应的存在,会导致严重的过电压。平波电抗器和整流器 I_{min} 的设置能帮助减小CE发生的概率。

2) 换相失败(CF)或触发脉冲丢失

当换向电压减小或直流电流增大时,导致关断角减小,如果阀的关断角小于最小关断角,就可能发生换相失败。同时,触发脉冲丢失也会导致不开通故障(整流器)或换相失败(逆变器)。对于单次换相失败通常采用换流器的自动恢复;对于多次换相失败采用换相角分步拉大或静态低压限流(VDCL)措施。

3) 内部短路或直流线路短路

由于换流器阀厅完全封闭并配有空调措施,阀的额定值能够承受这种故障冲击,因此换流桥内部短路故障是很少见的。然而,套管故障或冷却水泄漏也可导致短路故障,此时交流断路器将跳闸保护。直流线路故障比较常见,基本的保护由阀组差动保护提供,采用触发角强迫延迟、动态VDCL、三次重起不成功跳交流断路器等方法进行保护。

4) 线路过电压或绝缘失效

线路过电压故障一般采取降压和限压两种措施。降压措施包括妥善设计控制调节系统、采用阻尼装置、采用平波电抗器、加载冲击波吸收电容器等。限压措施有:从交流线路侵入的过电压受到交流母线避雷器的限制;从直流线路侵入换流器的过电压也受到直流避雷器的限制;阀组滤波器和直流滤波器等关键部件都有自己的避雷器。直流输电工程中,由于污秽或腐蚀等导致线路设备的绝缘失效,首先由直流仿真器来确定合适的绝缘配合方案,选取耐腐蚀耐高温的绝缘材料,并对其定期进行性能检测和更新。

3.2 直流输电保护系统

特高压直流输电工程主回路采用双12脉动的阀组串联的接线方案,存在多种运行方式供选择,从而提高了直流系统运行的灵活性和可用率,因此

特高压系统对直流保护系统可靠性的要求更高^[10]。例如，云广±800 kV 直流工程有三套保护装置，它们的硬件配置基本一致，每套系统均包含有独立的电源、就地操作面板、测量系统、SIMADYN D 系统、数字量接口和报警系统。正常情况下，三套直流保护系统并列运行，出口逻辑为三取二逻辑。当任一套直流系统发生故障时，出口逻辑自动转入二取一逻辑。

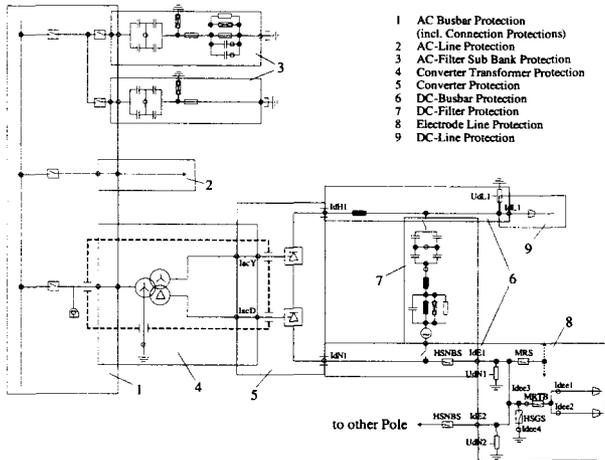


图 4 直流保护系统简图

Fig.4 DC protection system diagram

特高压直流保护系统结构见图 4，实现的保护功能主要有：高压换流器保护、低压换流器保护、阀连接母线保护、直流母线保护、地极引线保护、直流线路保护、开关保护等^[11,12]。

3.2.1 换流器保护^[13]（对应图 4 中的 5 区）

1) 换流器三角侧短路保护

$$\text{动作方程为： } I_{ACA} - \min(I_{dH} - I_{dN}) > \Delta_{set}$$

其中： I_{ACA} 为换流变二次绕组三角侧电流的整流值； I_{dH} 为对应换流器高压母线侧电流； I_{dN} 为对应换流器中性母线侧电流； Δ_{set} 为设定值。

动作后果为：紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关、跳开相应极的高速中性母线开关，对于整流侧还将闭锁触发脉冲。

2) 换流器星型侧短路保护

$$\text{动作方程为： } I_{ACY} - \min(I_{dH} - I_{dN}) > \Delta_{set}$$

其中： I_{ACY} 为换流变二次绕组星型侧电流的整流值。

动作后果与换流器三角侧短路保护一致。

3) 交流过流保护

动作方程为：

$$\max(I_{ACA}, I_{ACY}) > \Delta_{set}(1,2,3,4)$$

其中： $\Delta_{set}(1,2,3,4)$ 分别为四段设定值，各段定值均有各自相应的延时。

1 段、2 段过流用于控制长时间过负荷故障；3 段为逆变器短路后备保护；4 段作为整流器短路、直流短路的后备保护，在通信中断、交流系统故障和直流线路故障的情况下不跳闸。

动作后果均为：紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关。

4) 三角侧桥差保护

动作方程为：

$$\max(I_{ACA}, I_{ACY}) - I_{ACA} > \Delta_{set}(1,2)$$

其中： $\Delta_{set}(1,2)$ 分别为两段设定值，各段定值均有各自相应的延时。

动作后果分别为：1 段降电流；2 段紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关。

5) 星型侧桥差保护

动作方程为：

$$\max(I_{ACA}, I_{ACY}) - I_{ACY} > \Delta_{set}(1,2)$$

其中： $\Delta_{set}(1,2)$ 分别为两段设定值，各段定值均有各自相应的延时。

动作后果与星型侧桥差保护一致。

6) 直流差动保护

$$\text{动作方程为： } |I_{dH} - I_{dN}| > \Delta_{set}$$

其中： Δ_{set} 为设定值，该定值有相应的延时。

动作后果为：紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关、跳开相应极的高速中性母线开关，对于整流侧还将闭锁触发脉冲。

3.2.2 直流母线保护（对应图 4 中的 6 区）

1) 高压直流母线差动保护^[14]

$$\text{动作方程为： } |I_{dL} - I_{dH}| > \Delta_{set}$$

其中： I_{dL} 为高压直流线路电流（在并联线路运行模式下， I_{dL} 为两条直流线路电流的总和，其它模式下仅为相应极的直流线路电流）； Δ_{set} 为设定值，该定值有相应的延时。

动作后果为：紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关、跳开相应极的高速中性母线开关，对于逆变器还将投入旁通对。

2) 中性直流母线差动保护

$$\text{动作方程为： } |I_{dN} - I_{dE}| > \Delta_{set}(1,2)$$

其中： I_{dE} 为中性线路侧电流； $\Delta_{set}(1,2)$ 分别为两段设定值，各段定值均有各自相应的延时。

动作后果为：紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关、跳开相应极的高速中性母线开关。

3) 直流过流保护

动作方程为: $I_{dH} > \Delta_{set}(1,2,3,4)$

其中: $\Delta_{set}(1,2,3,4)$ 分别为四段设定值, 各段定值均有各自相应的延时。

该保护范围含盖了整个极, 并作为该极其它保护的后备保护。其中 1 段、2 段为直流短路保护; 3 段、4 段为控制失败或长期过负荷的后备保护。该保护在通信故障, 交流系统故障和直流线路故障的情况下不跳闸。

动作后果为: 紧急闭锁相应极、跳开相应换流变的进线开关。

3.2.3 接地极线路保护 (对应图 4 中 8 区)

1) 中性母线差动保护

动作方程为: $|I_{dE} - I_{dec}| > \Delta_{set}$

其中: I_{dE} 为中性线路综合电流; I_{dec} 为接地极线路综合电流; Δ_{set} 为设定值, 该定值有相应的延时。

I_{dE} 和 I_{dec} 在各种运行模式下, 其计算方式各不相同, 具体计算方法如下:

双极、单极大地返回或单极并联线路模式:

I_{dE} 为 $|I_{dE1} - I_{dE2}|$; I_{dec} 为 $|I_{dec1} + I_{dec2}|$; I_{dec1} 、 I_{dec2} 分别为接地极两个分支线路的电流。

金属返回模式:

I_{dE} 为 $|I_{dE1} - I_{dE2}|$; I_{dec} 为 $|I_{dec1} + I_{dec2} + I_{dec4} + I_{dLotherpole}|$;

动作后果在各种运行模式下, 也不尽相同, 在双极模式下, 仅发出告警; 在其它运行模式下将闭锁相应极。

2) 接地极电流不平衡保护

动作方程为: $|I_{dec1} - I_{dec2}| > \Delta_{set}$

其中: Δ_{set} 为设定值, 该定值有相应的延时。

动作后果为: 双极模式下, 仅发出告警; 在其它运行模式下将闭锁相应极。

3) 接地极过流保护

动作方程为: $|I_{dec1}| > \Delta_{set}$ OR $|I_{dec2}| > \Delta_{set}$

其中: Δ_{set} 为设定值, 该定值有相应的延时。

动作后果为: 闭锁运行极。

4) 过电压保护 (接地极开路保护)

动作方程为: $|U_{dN}| > \Delta_{set}$

其中: Δ_{set} 为设定值, 该定值有相应的延时。

动作后果为: 合上高速接地开关;

在双极模式下, 该保护动作合上高速接地开关后, 可以手动拉开金属转换开关 (MRTB), 隔离故障的接地极线路。此时, 若 I_{dec4} 大于设定值将闭锁运行极 (金属转换接地故障保护 51MGFP); 若 I_{dec4} 小

于设定值将仅发出告警; 在其它模式下, 该保护动作合上高速接地开关后将闭锁运行极。(在单极运行模式下, 由于电流比较大, 不允许通过站内接地开关接地运行。)

5) 金属返回接地故障保护

动作方程为: 在单极金属返回运行模式下且

$I_{dec4} > \Delta_{set}$

动作后果为: 闭锁相应极。

3.2.4 直流线路保护 (对应图 4 中的 9 区)

直流线路保护由线路设备保护和开关保护两部分组成^[15]。其中线路设备保护包含以下五部分:

1) 行波保护

动作方程为: $\left| \frac{dU_L}{dt} \right| > \Delta_{set}$ & $\left| \frac{dI_L}{dt} \right| > \Delta_{set}$ & $|dUdL| > \Delta_{set}$

其中: $\frac{dU_L}{dt}$ 为直流线路电压变化率; $\frac{dI_L}{dt}$ 为直流线路电流变化率; $dUdL$ 为直流线路电压变化量。

动作后果为: 启动直流线路故障恢复顺序。该保护的保护区从整流侧平波电抗器开始一直到逆变站的平波电抗器, 启动直流线路故障恢复顺序后, 极控系统将在一个去游离时间后, 重新启动故障极, 若启动次数超出设定次数将直接闭锁相应极。

2) 低电压保护

动作方程为: $|U_{dL}| < \Delta_{set}$ & $\left| \frac{dU_L}{dt} \right| > \Delta_{set}$

其中: U_{dL} 为直流线路电压。

动作后果为: 启动直流线路故障恢复顺序。该保护为直流线路行波保护的后备保护。

3) 直流线路差动保护

动作方程为: $|I_{dL} - I_{dLotherstation}| > \Delta_{set}$

其中: $I_{dLotherstation}$ 为对站的直流线路电流。

动作后果为: 启动直流线路故障恢复顺序。该保护为行波保护、低电压保护特别是高阻故障时的后备保护。

4) 交直流碰线保护

动作方程为:

$|I_{dL}(50Hz)| > \Delta_{set}(1,2)$ OR $|I_{dL}(100Hz)| > \Delta_{set}$

低定值 (1, 2)。

其中: $I_{dL}(50Hz)$ 为直流线路电流的 50 Hz 分量;

$I_{dL}(100Hz)$ 为直流线路电流的 100 Hz 分量。

动作后果: 1 段降电流 (短时将电流降为 0.3 倍参考值); 在 1 段降电流后, 若仍然不能改善故障状态, 2 段将在一个较长的延时后将闭锁运行极。

5) 远方站故障检测

动作方程为:

$$|U_{dL}(50\text{Hz})| > \Delta_{set} \ \& \ |I_{dL}(100\text{Hz})| > \Delta_{set} \text{ 高定值}$$

动作后果: 启动极闭锁顺序。该保护仅在整流站起作用, 且只有在通信故障的情况下才能动出口。

直流线路开关保护包含以下四部分:

1) 高速中性母线开关保护

动作方程为: 断开高速中性母线开关后

$$I_{dE} > \Delta_{set}$$

其中: I_{dE} 为相应极的高速中性线路电流。

动作后果为: 合上相应极的高速中性母线开关。

2) 高速接地开关保护

动作方程为: 断开高速接地开关后 $|I_{dec4}| > \Delta_{set}$

其中: I_{dec4} 为高速接地开关电流。

动作后果为: 合上高速接地开关。

3) 金属回线开关保护

动作方程为: 断开金属回线开关后

$$|I_{d\text{Other Pole}}| > \Delta_{set} \text{ 或 合上金属回线开关后}$$

$$|I_{d\text{Other Pole}}| < \Delta_{set} \text{ 且 } I_{dE} > \Delta_{set} \text{。}$$

其中: $I_{d\text{Other Pole}}$ 为另外一极高压直流线电流。

动作后果分为两种情况: 若是断开时,

$$|I_{d\text{Other Pole}}| > \Delta_{set} \text{ 则重新合上金属回线转换开关}$$

(MRS); 若是在合上时, $|I_{d\text{Other Pole}}| < \Delta_{set}$ 且

$$I_{dE} > \Delta_{set} \text{ 则禁止分开金属回线转换开关 (MRTB)。}$$

4 结论

1) 本文将直流输电系统及其核心技术—换流技术应用到特高压大电网和交直流并网的实际工程中。

2) 结合云广±800kV 特高压直流输电工程, 本文系统地介绍了直流输电控制保护系统的分层冗余结构以及系统不同故障对应的保护措施。

3) 本文提出了直流输电工程中存在的换流器设备成本高、谐波、无功补偿和控制复杂等问题, 并给出了合理建议。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.1-18.
ZHAO Wan-jun.HVDC Transmission Engineering Technology[M].Beijing:China Electric Power Press, 2004.1-18.

[2] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

DAI Xi-jie. DC Transmission Base[M]. Beijing:China Water Power Press,2004.

[3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800kV 6400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-5.
SHU Yin-biao, LIU Ze-hong, GAO Li-ying, et al. A Preliminary Exploration for Design of ±800kV UHVDC Project with Transmission Capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006,30 (1):1-5.

[4] Arabi S, Kunder P, Sawada J H.Appropriate HVDC Transmission Simulation Models for Various Power System Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998 13(4):1292-1297.

[5] 钟庆, 张尧, 杨金明, 等. 现代控制技术在高压直流输电系统中的应用及其发展[J]. 继电器, 2006, 34 (9): 80-86.
ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, et al. Review on Application and Development of Modern Control Technologies in HVDC Systems [J]. Relay, 2006,34(9):80-86.

[6] 浙江大学发电教研组直流输电教研组.直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
Zhejiang University HVDC Research Team.HVDC Transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1982.

[7] 张海凤, 朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响[J]. 继电器, 2007, 31(16).
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Influence of Rectifier AC Fault on HVDC Transmission System [J]. Relay, 2007, 31(16).

[8] 颜秉勇, 田作华, 施颂椒, 等. 高压直流输电系统故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (16): 57-59.
YAN Bing-yong, TIAN Zuo-hua, SHI Song-jiao, et al. A New Method for Fault Diagnosis in HVDC Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(16):57-59.

[9] 段玉倩, 黎小林, 饶宏, 等. 云广特高压直流输电系统直流滤波器性能的若干问题[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 90-94.
DUAN Yu-qian, LI Xiao-lin, RAO Hong, et al. Research on Several Issues on DC Filter Performance of Yun-Guang Ultra-HVDC Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(8):90-94.

[10] 陶瑜, 龙英, 韩伟. 高压直流输电控制保护技术发展的探讨[J]. 电力建设, 2008, 29(1): 1-5.
TAO Yu, LONG Ying, HAN Wei. Development of HVDC Transmission Control and Protection Technology [J]. Electric Power Construction, 2008,29(1): 1-5.

(下转第 64 页 continued on page 64)

加工处理,但数字滤波器的滤波效果差别较大^[10],如表1所示。其中沃尔什算法和余弦滤波算法滤除电铁负荷所产生的谐波效果较差,不能在电铁负荷较重的地区配合解微分方程算法与一阶差分算法使用。全波傅里叶算法理论上能完全滤去谐波分量,实际滤波效果也很好,在电铁负荷较重的地区配合解微分方程算法与一阶差分算法使用能避免谐波对这两种算法的干扰。而最小二乘法滤除效果也较好,只是计算量较大,如果保护硬件条件允许,可根据电铁负荷所产生的谐波以3、5、7次谐波为主的情况,设计一种以滤除3、5、7次谐波为主的最小二乘法数字滤波器,也可满足安装在电铁负荷较重地区的微机距离保护使用解微分方程算法与一阶差分算法的计算需求。

参考文献

[1] 张直平. 城市电网谐波手册[M].北京:中国电力出版社,2001.

[2] 吴竞昌. 供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.

[3] 胡玉峰,尹项根,陈德树,等.TCSC的继电保护数字仿真研究[J].电力系统自动化,2002,26(16):39-44. HU Yu-feng,YIN Xiang-gen,CHEN De-shu,et al.Digital Simulation of Protective Relaying based on TCSC[J].Automation of Electric Power Systems,2002,26(16):39-44.

[4] 杨奇逊,黄少锋,微型机继电保护基础(第二版)[M].北京:水利电力出版社,2005.

[5] 王梅义. 电网继电保护应用[M].北京:中国电力出版社,1999.

[6] 杨奇逊,刘建飞,张涛,等. 现代微机保护技术的发

展于分析[J].电力设备,2003,4(5):10-14.

YANG Qi-xun,LIU Jian-fei,ZHANG Tao, et al.Technical Development and Analysis on Modern Microprocessor-based Protection[J].Electrical Equipment,2003,4(5):10-14.

[7] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M].北京:中国水利水电出版社,2002.

[8] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M].北京:中国电力出版社,2007.

[9] 郭征,贺家李,扬洪平,等. 电力系统故障时继电保护装置动态特性的数字仿真[J].电力系统自动化,2003,27(11):38-40. GUO Zheng, HE Jia-li, YANG Hong-ping,et al.Digital Simulation of Dynamic Performance of Protective Relaying Devices During Faults[J].Automation of Electric Power Systems,2003,27(11):38-40.

[10] 胡剑琛. 微机继电保护数据预处理的研究(硕士学位论文)[D].北京:华北电力大学,2004.

[11] 张晶晶,曹锐. 距离保护特性元件躲过渡电阻能力分析与研究[J].继电器,2004,32(6):17-19,26. ZHANG Jing-jing, CAO Rui. Analysis and Research on the Ability of Distance Protection Element Standing the Influence of Transition Resistanc [J].Relay,2004,32(6):17-19,26.

收稿日期:2008-08-22; 修回日期:2008-10-13

作者简介:

蓝智晖(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: lanzhihui81@yahoo.com.cn

徐永海(1966-),男,教授,主要从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作。

(上接第58页 continued from page 58)

[11] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-5. QI Xu, ZENG De-wen, SHI Da-jun, et al. Study on Impacts of UHVDC Transmission on Power System Stability[J]. Power System Technology, 2006,30(2):1-5.

[12] Scherer H N,Vassell G S.Transmission of Electric Power at Ultra-high Voltages: Current Status and Future Prospects[J].Proceedings of the IEEE,1985,73(8):1252-1278.

[13] 李立成. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备,2006,7(3):1-4. LI Li-cheng. Technical Characteristics and Engineering Applications of UHVDC Power Transmission[J]. Electrical Equipment,2006,7(3):1-4.

[14] Hammad A E.Stability and Control of HVDC and AC Transmission in Parallel[J].IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(4):1545-1554.

[15] Johnson B K.HVDC Models Used in Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(2):1153-1163.

收稿日期:2008-09-06; 修回日期:2008-09-29

作者简介:

王 蓁(1984-),女,硕士生,主要从事电力系统及其自动化方向的研究。E-mail:mimi19840223@163.com